



Research Paper

DOI : 10.5281/zenodo.4108797

Open access



Processus de formation du film d'oxyde de l'acier ferromagnétique à l'air ambiant et sous vide

Process for forming ferromagnetic steel oxide film in air and vacuum

Mohamed AMIRAT^a, Amine BELOUFA^a, Hamidou BENZENINE^{b,c,*}

^aSmart Structures Laboratory (SSL), Department of Mechanical engineering, Technology Institut, UnivCtr of AinTémouchent, Po Box 284,46000, Algeria

^bDepartment of Mechanical Engineering, Institute of Technology.University.Center BELHADJ BouchaibBP 284 RP, AinTémouchent, 46000, Algeria.

^cLaboratory of Energetic and Applied Thermal (ETAP), Faculty of Technology, B.P 230, University of Tlemcen, 13000, Algeria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 02 April 20

Received in revised form 05 May 20

Accepted 09 May 20

Mots clés:

Frottement; usure; champ magnétique; film d'oxyde.

Keywords:

Friction, wear, magnetic field, oxide film

RÉSUMÉ

Lors de l'application d'un champ magnétique autour d'un contact d'un couple ferromagnétique, ce dernier modifie largement le comportement du frottement et de l'usure du contact. Les tests de frottement sont réalisés dans deux environnements gazeux différents : à l'air ambiant et sous vide à 5.10^{-5} Pa.

A l'air ambiant, l'effet du champ magnétique sur le taux d'usure est significatif, remarquant que l'application d'un champ magnétique suffisant ($H = 10$ kA/m) diminue le taux d'usure de 6 à 10 fois. L'effet du champ magnétique sur la tribologie du contact à l'air libre reste valable jusqu'à une intensité limite $H = 40$ kA/m. Au-delà de cette limite, d'autres effets se manifestent : augmentation de l'attraction magnétique et de la température de contact due aux courants de Foucault. De plus, les particules d'usure non oxydées, résultant de l'usure abrasive au début du glissement, restent piégées à cause de la forte attraction magnétique. Le processus d'usure sous vide est complètement différent. Notons ici que l'usure est adhésive et sévère. L'adhésion provoque un transfert de particule entre le pion et le disque. En revanche, sous vide le champ magnétique ne génère pas de couche d'oxyde, car le taux d'oxygène dans cet environnement est négligeable.

ABSTRACT

When applying a magnetic field around a contact of a ferromagnetic couple, the latter largely modifies the behavior of friction and wear of the contact. The friction tests are carried out in two different gaseous environments: with ambient air and under vacuum at 5.10^{-5} Pa.

In ambient air, the effect of the magnetic field on the wear rate is significant, noting that the application of a sufficient magnetic field ($H = 10$ kA/m) decreases the wear rate from 6 to 10 time. The effect of the magnetic field on the tribology of contact in the open air remains valid up to a limit intensity $H = 40$ kA/m. Beyond this limit, other effects are manifested: increased magnetic attraction and contact temperature due to eddy currents. In addition, non-oxidized wear particles, resulting from abrasive wear at the start of sliding, remain trapped due to the strong magnetic attraction.

The vacuum wear process is completely different. Note here that the wear is adhesive and severe. The adhesion causes a particle transfer between the pin and the disc. On the other hand, under vacuum the magnetic field does not generate an oxide layer, since the oxygen level in this environment is negligible.

1 Introduction

La réduction du frottement et d'usure présente un grand intérêt pour les tribologues. Les recherches associées ont été menées principalement par des expériences [1-2], où les résultats présentés proviennent principalement du banc d'essai pion/disc.

* Corresponding author.

E-mail address: b.hamidou@yahoo.fr

Ainsi, le champ magnétique est généré dans plusieurs secteurs mécaniques et électriques tels que les générateurs, les moteurs électriques, le transport en train ...etc. Il est très important de comprendre l'influence du champ magnétique sur le comportement tribologique des contacts métalliques, afin de prévenir les mécanismes de défaillance et d'obtenir une efficacité énergétique importante. L'objectif de cette étude est d'étudier les mécanismes et les effets par lesquels le champ magnétique modifie le contact de glissement sec du couple acier ferromagnétique / acier ferromagnétique.

L'effet du champ magnétique sur le frottement et le mode d'usure a été étudié par certains chercheurs [3-14]. Après tous les travaux réalisés sur ces études il est difficile de tirer des conclusions définitives et fondamentales. En 1970, Muju [9] fut probablement le premier à observer les effets du champ magnétique sur le mode d'usure de différents matériaux métalliques. Ces résultats ont montré que le champ magnétique augmente la dureté de la surface de glissement et la perméabilité magnétique.

Hiratsuka et Sasada [6] ont observé une transition d'usure sévère-légère et une réduction du taux d'usure et du coefficient de frottement dans l'air en raison du champ magnétique lors des expériences de broche sur disque réalisées pour les contacts Ni/Ni et Fe/Fe. Paulmier et Zaidi [7] ont observé une diminution du taux d'usure et du coefficient de frottement d'un couple acier / acier dans l'air ambiant.

L'effet du champ magnétique a une relation directe avec l'atmosphère autour de la surface de frottement. De plus, l'application du champ magnétique affecte les jonctions de contact et les débris d'usure. Dans notre étude, nous déterminons la constitution des films d'oxyde comme, leurs croissance cinétique et leurs rôle sur le comportement tribologique et le contact thermique du couple ferromagnétique / ferromagnétique.

L'objectif principal de cette étude est d'étudier les mécanismes et les effets par lesquels le champ magnétique affecte le contact glissant. Un autre objectif est d'évaluer le rôle de la pression partielle d'oxygène. Dans ce cas, le contact a été réalisé en atmosphère contrôlée sous champ magnétique pour identifier le phénomène physico-chimique et les caractéristiques mécaniques du processus d'oxydation.

2 Procédé expérimental

Les tests d'usure et de frottement menés pour cette étude ont été effectués sur un tribomètre pion-sur-disque, localisé dans une enceinte sous vide en acier inox [4]. Pour investiguer l'effet du champ magnétique sur le comportement tribologique des matériaux ferromagnétiques, une bobine a été placée autour du porte pion parcouru par un courant électrique qui permet de produire un champ magnétique perpendiculaire à la surface de contact. L'intensité du champ magnétique varie entre 0 et 40 kA/m suivant l'intensité du courant électrique. Le matériau utilisé pour les pions et les disques est le même, c'est l'acier carboné ferromagnétique XC45. La dureté des échantillons avant l'essai est 220 Hv.

Les disques utilisés ont un diamètre de 70 mm ; les pions également sont des cylindres en acier XC45 de diamètre 5 mm et de longueur 15 mm, à face plane de rugosité 0,3 μm . La vitesse de glissement est fixée à une valeur constante $V = 0,5$ m/s et le rayon de la piste d'usure est de 25 mm. La surface de contact est polie à l'aide d'un papier abrasif, ce polissage a été fait en trois étapes : avec du papier abrasif de grade 600, puis 1200 et au final avec celui de 2400.

Les tests sont réalisés sous deux types d'environnement gazeux, à l'air ambiant, et sous vide à une pression de 5.10^{-5} Pa. La température ambiante est environ 21°C, l'humidité relative varie entre 30% et 40% à l'air ambiant.

Le taux d'usure du pion et du disque est obtenu par leurs pertes de masse. Les essais sont réalisés sous deux différentes charges normales appliquées au contact 0,1 N et 18,5 N. Ces deux charges sont obtenues à l'aide des masses mortes.

3 Résultats

En présence du champ magnétique à l'air ambiant, le film d'oxyde est généré par des réactions tribochimique pendant le contact glissant en modifiant le mécanisme d'usure, ce phénomène reste le même sous oxygène avec ou sans champ magnétique. Pour expliquer le mécanisme de l'oxydation sur la surface de contact, nous avons mené des tests pour deux processus différents: un contact statique et un contact glissant sous l'application d'un champ magnétique à l'air ambiant.

3.1 Contact statique sous champ magnétique à l'air ambiant

En contact statique, l'application du champ magnétique à l'air ambiant n'a aucune influence sur le mécanisme d'oxydation. Afin de déterminer l'effet du champ magnétique sur les contacts statiques du couple de matériaux ferromagnétiques acier/acier, nous avons appliqué un champ magnétique d'intensité $H = 20\text{kA/m}$. L'application du champ magnétique sur le contact statique a été faite en plusieurs intervalles de temps : de 30 min à 8 heures avec un pas de 30 min.

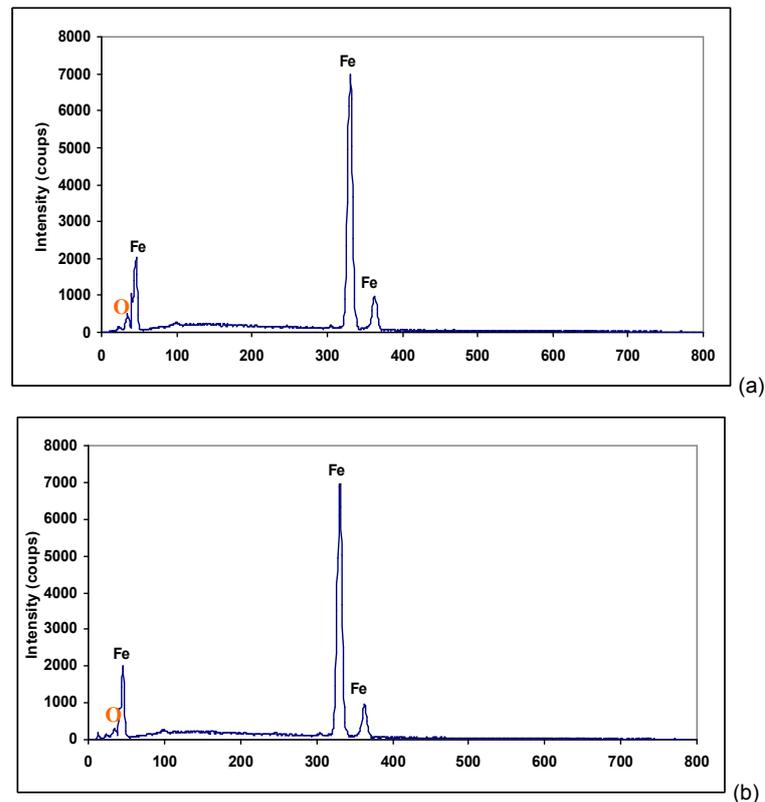


Fig. 1– L'analyse EDX de la surface du disque en contact statique à l'air ambiant, ($N = 1\text{N}$, $t = 8\text{h}$, $H = 20\text{ kA/m}$), (a) à l'extérieure de la zone de contact, (b) Dans la zone de contact.

La Figure 1 montre l'analyse EDX de la surface de contact à l'air ambiant obtenue après l'application du champ magnétique pendant 8 heures. L'analyse EDX montre que le taux d'oxygène de la zone de contact reste quasiment le même dans la surface de contact et/ou à l'extérieur de cette surface. Comme le montre la Figure 1, l'intensité de l'oxygène est d'environ 300 coups, cette intensité est la même que celle d'une surface d'acier fraîche. Nous pouvons donc conclure que le champ magnétique n'a quasiment aucun effet sur le contact statique du couple acier ferromagnétique/acier ferromagnétique.

3.2 Apparition et formation du film d'oxyde sur la surface de contact à l'air ambiant dans le contact dynamique

Pour contrôler la phase de nucléation et la croissance de la couche d'oxyde au niveau des jonctions de contact, et en présence du champ magnétique à l'air ambiant, une très faible charge normale ($N = 1\text{ N}$) a été appliquée. Cette charge garde le contact entre le pion et le disque, et permette de minimiser l'usure abrasive due à la charge de contact. De même, une faible vitesse de glissement ($V = 0,1\text{ m/s}$) est choisie afin de suivre l'évolution de la formation du film d'oxyde sur la piste de glissement. Au début du glissement (environ 30 m), la surface de glissement restait fraîche. Après cette distance, des petites zones noires apparaissent progressivement sur la piste de glissement (Fig. 2-a). Après environ une heure de contact (360 m de glissement), le film d'oxyde devient plus large.

L'analyse par MEB des différentes surfaces de glissement montre que seules les aspérités les plus longues de la surface de contact sont oxydées au début du glissement (Fig. 2-a et 2-b). Dans les conditions mentionnées précédemment, le poids

du disque augmente après l'oxydation. Approximativement, il est environ 8.10^{-4} g après une heure de contact glissant. Ce poids supplémentaire peut expliquer l'adsorption de molécules d'oxygène sur les surfaces fraîches lors du contact magnétisé. En effet, l'augmentation de l'intensité magnétique augmente l'adsorption des molécules d'oxygène. Ce phénomène est une conséquence de la constriction des lignes magnétiques au niveau des jonctions de contact. Zaidi [15] a utilisé une chambre à pression d'oxygène régulière à 10^{-2} Torr, il a constaté que le frottement dans un champ magnétique consomme plus d'oxygène.

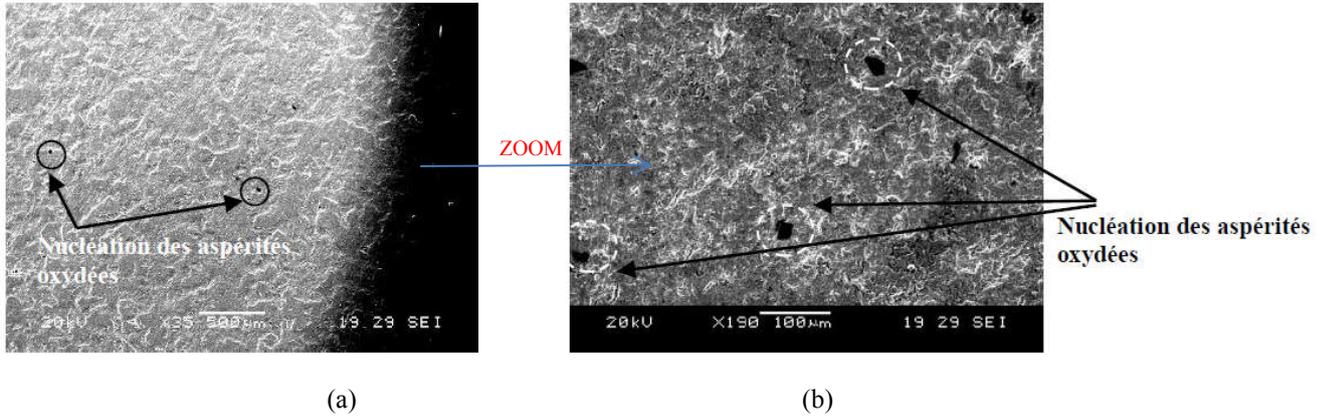


Fig. 2– Nucléation et formation des premières jonctions oxydées sous l’application du champ magnétique à l’air ambiant. (N = 1 N, v = 0,1 m/s, H = 20 kA/m),

3.3 Effet du champ magnétique sur l’oxydation à l’air ambiant

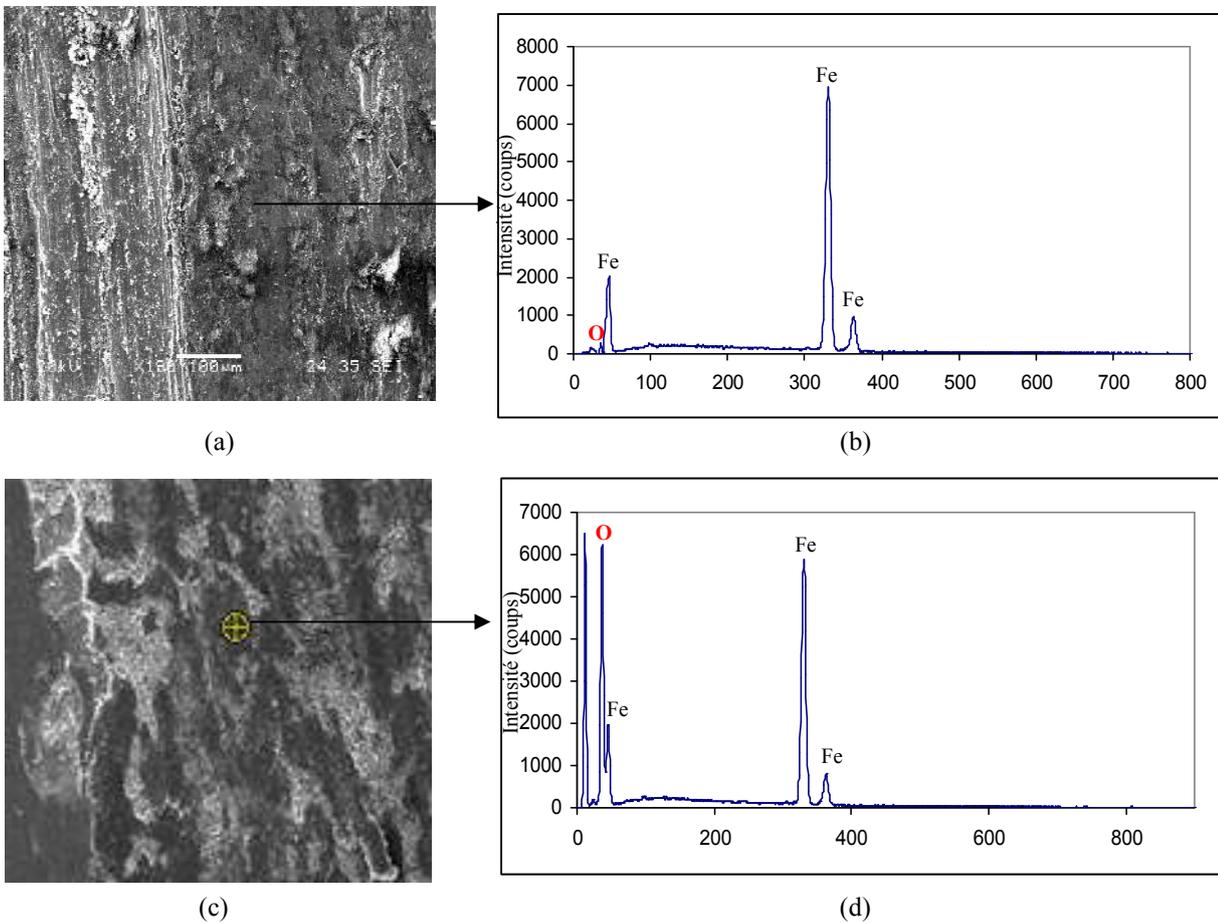


Fig. 3– Formation d’une piste d’usure quasiment oxydée sous l’application du champ magnétique à l’air ambiant. (a) Image par MEB de la surface usée sans champ magnétique (b) Analyse EDX de la surface usée (c) Image par MEB de la surface usée avec champ magnétique (d) Analyse EDX de la surface usée ($N = 18,5 \text{ N}$, $v = 0,1 \text{ m/s}$, $H = 20 \text{ kA/m}$),

Les pistes d’usure obtenues à l’air ambiant avec et sans application du champ magnétique ont montré que le taux d’oxydation augmente avec l’intensité magnétique H .

L’oxydation de la piste d’usure à l’air ambiant paraît homogène à l’œil nue, sauf que l’analyse par microscope électronique à balayage (MEB) montre que l’oxydation reste partielle (Fig. 3). À partir de ces résultats nous pouvons conclure que le taux d’oxydation est proportionnel à l’intensité magnétique. Ce taux augmente au fur et à mesure que l’intensité magnétique augmente, ce processus reste valable jusqu’à une intensité maximale $H = 40 \text{ kA/m}$. Au-delà de cette intensité, la force magnétique devient très importante et augmente le couple résistant du contact dynamique. Lorsque la couche d’oxyde apparaît sur la piste d’usure, l’usure devient douce et le contact passe d’un contact acier/acier à un contact acier/film d’oxyde/acier. Cette transition d’usure permet de réduire le taux d’usure d’un rapport de 2 à 10 fois moins et permet de réduire le coefficient de frottement respectivement en augmentant l’intensité magnétique de 5 à 20 kA/m.

3.4 Effet du champ magnétique sur l’oxydation sous vide

Sous vide à 5.10^{-5} Pa , l’application du champ magnétique ne génère pas la formation du film d’oxyde sur l’interface. Dans cet environnement, les particules d’usure restent piégées dans l’interface, et seront attirées par la force magnétique pendant le glissement. Ces particules provoquent un écrouissage de l’interface de contact (Fig.4). Cet écrouissage génère le transfert de particules d’usure du disque vers le pion. Les particules de transfert rendent la piste d’usure très rugueuse et favorisent des microsoudures des jonctions de contact, ce processus augmente le taux d’usure.

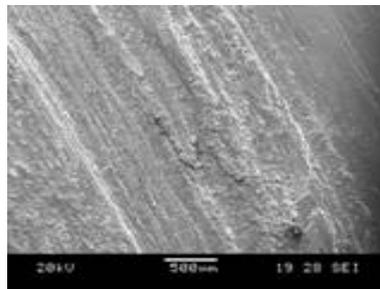


Fig. 4– Image MEB de la piste d’usure obtenue sous vide ($P = 5.10^{-5} \text{ Pa}$),

Nous pouvons conclure que sous vide, l’échange moléculaire entre les ions de fer et les ions d’oxygène est quasi-négligeable dans cet environnement, ce qui empêche la formation des oxydes de fer. Sous ces conditions, l’usure sévère répétitive conduit à re-fraîchir la surface usée.

Les résultats obtenus sous vide conduisent à trois conclusions essentielles :

- La faible pression partielle d’oxygène ne génère pas la formation du film d’oxyde,
- Le champ magnétique accélère l’adsorption des molécules d’oxygène vers les ions de fer,
- Quand la vitesse d’oxydation est très faible, l’usure sévère re-fraîchit la piste d’usure.

4 Discussion

4.1 Processus de formation du film d’oxyde

À l’air ambiant, une intensité magnétique suffisante génère l’oxydation de la surface de frottement. Par conséquent, la formation du film d’oxyde sur la surface usée nécessite une certaine distance de contact glissant. En phase de rodage, les

aspérités les plus longues de la surface de contact subissent une déformation plastique, ces déformations favorisent la formation et la propagation des fissures. Au début de la phase de rodage, l'usure sévère accentue et permet de dégager une grande partie de débris d'usure avant la formation de la couche d'oxyde. Après la phase de rodage de moins de 50m de glissement, le nucléation du film d'oxyde commence à apparaître sur l'interface de contact. L'accroissement du film d'oxyde augmente avec la distance de glissement jusqu'à où la surface de contact devient recouverte par une couche d'oxyde. Quand le film d'oxyde atteint une épaisseur critique, l'accroissement cesse et les nouvelles particules d'oxyde dégagées seront éjectées comme débris d'usure [2], la taille de ces particules reste très fine. Ce processus se répète en continu. En conséquence, le mode d'usure change d'une usure sévère à une usure douce. La variation du taux d'usure correspond à la variation de l'intensité du champ magnétique et la pression partielle d'oxygène.

Selon les résultats obtenus à l'air ambiant avec ou sans champ magnétique, le pourcentage d'oxygène dans l'environnement joue un rôle très important sur le taux d'oxydation de la piste d'usure.

À partir de la figure 1 et 3, nous pouvons déduire que l'épaisseur et l'étalement de la couche d'oxyde n'est pas uniforme sur la piste d'usure. Ce phénomène explique bien que l'oxydation de la piste d'usure n'est pas due seulement à l'échange de molécules entre l'oxygène et le fer, c'est plutôt le mécanisme de déformation plastique et la constriction des lignes magnétique au niveau des aspérités de contact qui accélèrent l'oxydation des aspérités de contact.

4.2 Conservation du spin électronique

L'analyse par EDX des surfaces de contact montre que la présence du champ magnétique favorise la formation des particules d'oxyde. On peut dire que le système tribologique garde sa symétrie magnétique d'avant transformation chimique conformément au principe de conservation du spin électronique. Selon Amirat [16], les oxydes appariés lors de l'oxydation sont les suivants : l'hématite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, la maghémite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et magnétite Fe_3O_4 .

Les électrons 4s du fer ($\text{Fe} : 3d^6 4s^2$) ont des énergies inférieures à celle des électrons de l'état 3d. Ainsi, ce sont les électrons de l'état 3d qui rentrent en réaction avant les 4s. La magnétite Fe_3O_4 de composition ($\text{Fe}^{2+}, 2\text{Fe}^{3+}, 4\text{O}^{2-}$) correspond à l'extraction de deux électrons sur l'ion Fe^{2+} et de trois électrons sur l'ion Fe^{3+} [17]. L'extraction des électrons commence par l'état électronique 3d puis après l'état 4s (Fig. 5). Le moment magnétique des ions Fe^{2+} est $4\mu_B$ / ion Fe^{2+} . μ_B étant le magnéton de Bohr. La maghémite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ($2\text{Fe}^{3+}, 3\text{O}^{2-}$) a un moment magnétique $5\mu_B$ / ion Fe^{3+} . Sans champ magnétique, la population atomique du fer est équi-répartie en spin (+) $3d\uparrow$ et en spin (-) $3d\downarrow$. L'application du champ magnétique augmente la population $3d\uparrow$, orientées parallèlement à la direction du champ, et diminue la population $3d\downarrow$.

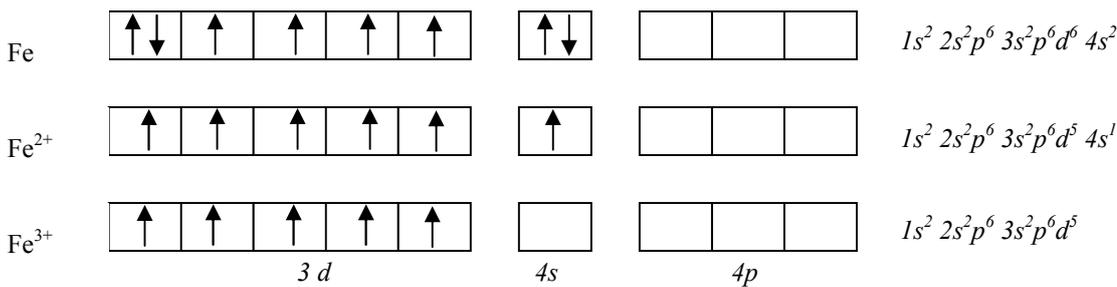


Fig. 5– Etat électronique de spins dans le fer et les ions de fer,

En effet, la différence ΔN des deux populations responsables du magnétisme de l'acier s'écrit :

$$\Delta N = N \uparrow - N \downarrow = N(1 - e^{-\frac{2\mu_B B}{kT}}) \approx N \frac{2\mu_B B}{kT} \tag{1}$$

Finalement, le moment magnétique s'écrit:

$$M = \Delta N \mu_B = N \left(\frac{2\mu_B B}{kT} \right) \mu_B \quad (2)$$

La conservation du moment magnétique conduit à une répartition du fer en x% atomes dans la magnétite et (1-x)% atomes dans la maghémite [17]. Sachant que le moment magnétique en volume d'un cristal de fer (Fe) cubique centré est de 2,22 μ_B /atomes.

$$\frac{4}{5}x + 2\frac{5}{5}(1-x) = 2,22 \quad (3)$$

soit x = 16%.

D'après le critère de Stoner, l'augmentation de la densité ΔN se traduit par un renforcement du magnétisme dans la surface. Cet effet est lié à un rétrécissement de la bande des atomes de fer (Fe) à la surface plutôt que dans le volume [17].

La couche d'oxyde agit comme une barrière qui s'interpose entre les atomes d'oxygène et le métal nu. Elle porte l'état énergétique de la surface à un bas niveau pour s'opposer à l'oxydation, son accroissement fait chuter la vitesse d'oxydation.

La température limite de l'oxydation varie suivant le couple de matériaux étudié. La cinétique de l'oxydation dépend par ailleurs du rapport Δ , rapport entre le volume équivalent de l'oxyde formé et celui du métal oxydé, déterminé par la relation suivante [18] :

$$\Delta = \frac{(m_a)_{oxy} \rho_{mat}}{(m_a)_{mat} \rho_{oxy}} \quad (4)$$

où $(m_a)_{oxy}$ et $(m_a)_{mat}$ sont respectivement les masses moléculaires de l'oxyde et du métal, et ρ_{oxy} et ρ_{mat} , leurs masses volumiques.

Pour des oxydes de fer, leur rapport Δ est donné dans le tableau suivant :

Tableau 1 - La masse volumique et le rapport Δ entre le volume équivalent de l'oxyde formé et celui du métal oxydé (fer) [18].

Oxyde formé	ρ_{mat} (g/cm ³)	ρ_{oxy} (g/cm ³)	Δ
FeO	7,88	5,99	1,69
Fe ₂ O ₃	7,88	5,24	2,15
Fe ₃ O ₄	7,88	5,18	2,10

Par ailleurs, lorsque le rapport Δ est inférieur à l'unité, le film d'oxyde ne peut pas recouvrir complètement la surface du métal. Il ne forme donc aucune barrière qui s'oppose à la diffusion de l'oxygène vers le métal. Dans ces conditions, l'oxydation du métal est continue ainsi que la cinétique de l'oxydation.

À l'autre extrême, quand le rapport Δ est assez élevé (supérieur à 2,4 environ), la cinétique de l'oxydation est également soumise à une loi linéaire quasi-constante, car le volume d'oxyde est si important qu'il provoque des fissures dans lesquelles l'oxygène peut pénétrer jusqu'au métal. Toutefois, lorsque le rapport Δ est compris entre 1 et 2,4 ; il y a toujours formation d'une couche protectrice d'oxyde, compacte et continue, avec une vitesse d'oxydation décroissante [18].

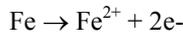
4.3 Réaction gaz-solide

Au début de l'oxydation, les atomes d'oxygène adsorbés possèdent une forte affinité pour les électrons de valence du métal. Ils acquièrent ainsi une charge négative et se repoussent mutuellement. La réaction peut alors atteindre une configuration énergétique plus favorable si certains atomes d'oxydes échangent leurs places avec des atomes métalliques superficiels. Ce phénomène conduit à la formation d'un germe d'oxyde épais. Or, un germe croît seulement s'il dépasse

une certaine taille critique [11]. La formation d'un germe stable nécessite donc plusieurs changements de phases. Cela explique le temps d'incubation correspondant à la zone d'adsorption chimique de l'oxygène [10].

En effet, si le réseau cristallin est parfait, il faudrait une énergie énorme pour qu'elle puisse écarter les ions et s'y frayer un chemin. Grâce aux lacunes concentrées en surface et en subsurface du métal, l'énergie d'ionisation devient très faible.

Des atomes de métal traversent l'interface métal-oxyde et rentrent dans le réseau d'oxyde sous forme d'ions Fe^{2+} :



Les ions ferreux et les électrons traversent la couche d'oxyde et atteignent l'interface oxyde/oxygène où deux électrons ionisent une demi-molécule d'oxygène adsorbée :



Où l'ion Fe^{2+} se place à côté d'un ion d'oxyde superficiel, contribuant à l'édification du réseau Fe-O en voie de formation.

La figure 6 montre le mécanisme d'oxydation et le rôle des lacunes. La vitesse d'oxydation diminue fortement avec l'épaisseur de la couche d'oxyde [19]. Le mécanisme d'oxydation peut être décomposé en trois étapes suivantes:

- Chimisorption de l'oxygène,
- Croissance latérale de germes d'oxyde,
- Croissance (en épaisseur) du film d'oxyde.

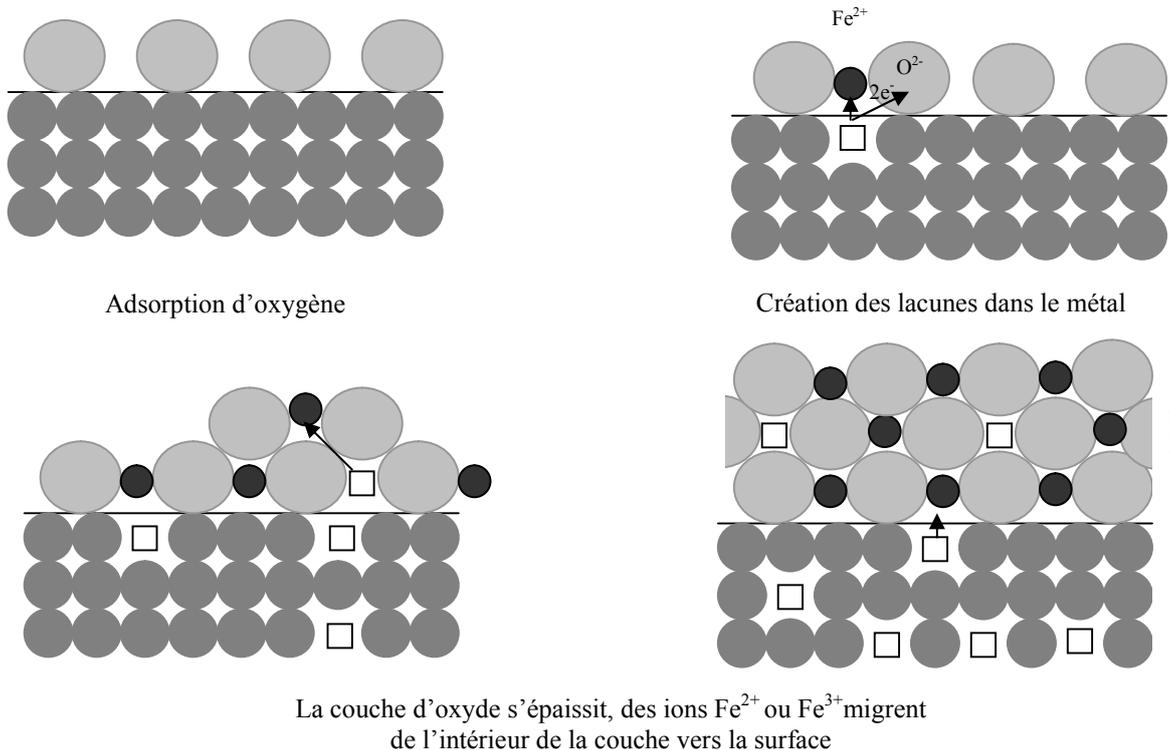


Fig. 6– Mécanismes réactionnels de l'oxydation du fer par diffusion ionique à travers les films d'oxyde.

5 Conclusion

Les divers procédés mécaniques et physiques mentionnés précédemment jouent simultanément sur l'activation de l'oxydation de la surface de contact glissant soumis à un champ magnétique. Quant à l'effet du champ magnétique sur la surface de contact des métaux ferromagnétique, il diffère selon les conditions appliquées au contact et aux propriétés magnétiques des deux matériaux en contact. Dans le cas du contact acier ferromagnétique/ acier ferromagnétique, le champ

magnétique génère une couche d'oxyde sur la surface usée; cette couche interagit comme un lubrifiant solide, elle empêche le contact direct métal/métal et réduit le taux d'usure spécifique.

La présente étude sur la formation de couche d'oxyde et l'usure d'oxydation sous champ magnétique appliqué dans deux milieux différents a conduit aux conclusions suivantes:

- Le contact statique sous champ magnétique n'a aucun effet sur l'oxydation de surface de contact.
- La faible pression partielle d'oxygène dans l'environnement ne permet pas la formation de couche d'oxyde (sous vide).
- Le champ magnétique accélère l'adsorption de molécules d'oxygène par le fer.
- Sous vide en présence du champ magnétique, l'usure sévère re-fraichi la piste d'usure.
- Le pourcentage d'oxygène dans l'environnement joue un rôle très important sur le taux d'oxydation de la surface usée.

6 Références

- [1] F.H. Stott and G.C. Wood, The influence of oxides on the friction and wear of alloys, *Tribology International*, Vol.11 (1978) pp.211-218.
- [2] M. Amirat, Etude thermomécanique et caractérisation du comportement tribologique de couples de matériaux ferromagnétique/ ferromagnétique et diamagnétique/ferromagnétique soumis à un champ magnétique dans une atmosphère contrôlée, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2008.
- [3] T.F.J. Quinn, Oxidation wear, *Wear*, Vol. 18 N° 5 (1971) pp.413-419.
- [4] H. Zaidi, M. Amirat, J. Frene, T. Mathia and D. Paulmier, Magnetotribology of ferromagnetic/ ferromagnetic sliding couple, *Wear*, Vol.263 (2007) pp.1518-1526.
- [5] R. Tyagi, S.K. Nath and S. Ray, Modelling of dry sliding oxidation-modified wear in two phase materials, *Wear*, Vol. 255 (2003) pp.327-332.
- [6] K. Hiratsuka, T. Sasada, Wear of metals in a magnetic field , *Wear* , Vol.110 (1987) pp.251-261
- [7] D. Paulmier, H. Zaidi, R. Bedri, E.K. Kadiri, L. Pan b and Q. Jiang, Steel surface modifications in magnetised sliding contact, *Surface and Coatings Technology*, Vol.76-77 (1995) pp.583-588.
- [8] T.F.J. Quinn, J.L. Sullivan, D.M. Rowson, Origins and development of oxidational wear at low ambient temperatures », *Wear* Vol.94 (1984) pp.175-191.
- [9] M. R. Muju and A. Ghosh, A model of adhesive wear in the presence of a magnetic field , *Wear*, Vol.41(1977) pp.103 – 116
- [10] P. W. Selwood, Magnetic field effects on the catalyzed nondissociative parahydrogen conversion rate, *Journal of Catalysis*, Vol.50 (1977) pp.15-23.
- [11] J. Bénard, J. Bardolle, F. Bouillon, M. Cagnet, J. Moreau and G.Valensi, L'oxydation des métaux, *Processus fondamentaux*, Tome 1, 1998.
- [12] M. Chiba, K. Morio and Y. Koizumi, Microstructure and magnetic properties of iron oxide thin films by solid reaction, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.239 (2002) pp.457-460.
- [13] X.H. Cui, S.Q. Wang, F. Wang, K.M. Chen, Research on oxidation wear mechanism of the cast steels, *Wear*, Vol.265 (2008) pp.468-476.
- [14] J.P. Perez, R. Carles and R. Fleckinger, *Electromagnétisme, « Fondements et applications »*, Dunod, Paris, 2002.
- [15] H. Zaidi, L. Pan, D. Paulmier and F. Robert, Influence of a magnetic field on the wear and friction behaviour of a nickel/XC 48 steel couple , *Wear*, Vol. 181-183 (1995) pp.799-804.
- [16] M. Amirat, H. Zaïdi and A. Senouci, Nucleation and Formation of oxide film with the magnetic field on dry sliding contact. *Lubrication Sciences*, John Wiley and Sons, Vol.23 (2010) pp.19-31.
- [17] du Trémolet de Lacheisserie E. D., *Magnétisme I, Fondements*, EDP Science, 2000.
- [18] J.P. Bailon and J.M. Darlot, *Des matériaux*, Presses internationales Polytechnique, 2000.